

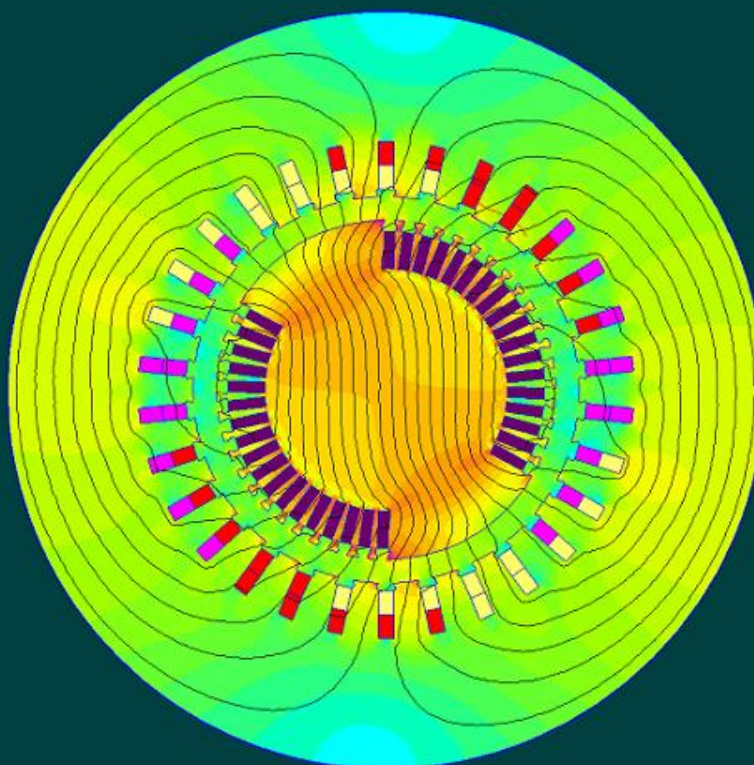
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»



В. И. Мильх

**ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВЫЕ РАСЧЕТЫ  
И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И  
СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ  
В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ**

МОНОГРАФИЯ



Харьков  
НТУ «ХПИ»  
2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

В. И. Мильх

**ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВЫЕ РАСЧЕТЫ  
И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ  
В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ**

МОНОГРАФИЯ

Утверждено ученым советом НТУ «ХПИ»

Харьков  
2017

УДК 621.313.322  
ББК 31.26  
М75

Рецензенты:

В. Ф. Болюх, *д-р техн. наук, проф.*,  
*Национальный технический университет*  
*«Харьковский политехнический институт»;*  
Ю. Н. Васьковский, *д-р техн. наук, проф.*,  
*Национальный технический университет Украины*  
*«Киевский политехнический институт»*

Утверждено ученым советом НТУ «ХПИ» как монографию,  
протокол №9 от 23.12.2016 г.

Монографія спрямована на розвиток теорії і методів проектування електричних машин взагалі і турбогенераторів, зокрема. Це робиться на основі чисельних методів розрахунку і аналізу їхніх магнітних полів, електромагнітних і силових параметрів, характеристик і процесів у поєднанні з використанням сучасної комп'ютерної техніки. Викладаються теоретичні основи чисельного аналізу, представляється програмне забезпечення, проводиться широкий розрахунковий аналіз на конкретних моделях турбогенераторів.

Призначено для наукових та інженерних працівників, що займаються розрахунком, проектуванням і дослідженням електричних машин, а також для студентів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка».

**Мильх В. И.**

**М75** Численно-полевые расчеты и анализ электромагнитных и силовых параметров и процессов в турбогенераторах : монография / В. И. Мильх. – Харьков : ФЛП Панов А. Н., 2017. – 204 с. – На рус. яз.

ISBN 978-617-7474-34-9

Монография направлена на развитие теории и методов проектирования электрических машин вообще и турбогенераторов, в частности. Это делается на основе численных методов расчета и анализа их магнитных полей, электромагнитных и силовых параметров, характеристик и процессов в сочетании с использованием современной компьютерной техники. Излагаются теоретические основы численного анализа, представляется программное обеспечение, проводится широкий расчетный анализ на конкретных моделях турбогенераторов.

Предназначено для научных и инженерных работников, занимающихся расчетом, проектированием и исследованием электрических машин, а также для студентов специальности «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика».

Ил. 277. Табл. 53. Библиогр. 71 назв.

УДК 621.313.322  
ББК 31.26

ISBN 978-617-7474-34-9

© В.И. Мильх, 2017  
© НТУ «ХПИ», 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ В УКРАИНЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ИХ СОЗДАНИИ .....	8
1.1. Обзор турбогенераторов производства харьковского завода «Электротяжмаш» .....	8
1.2. Достигнутый уровень в турбогенераторостроении .....	11
1.3. Обзор авторских работ по численно-полевым исследованиям турбогенераторов .....	14
2. РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ И СИСТЕМА НАПРАВЛЕНИЙ КООРДИНАТ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН .....	15
2.1. Введение к расчетным моделям турбогенераторов .....	15
2.2. Модели турбогенераторов для тестовых расчетов .....	16
2.2.1. Модель электромагнитной системы турбогенератора ТГ01 .....	16
2.2.2. Модель электромагнитной системы турбогенератора ТГ02 .....	17
2.2.3. Модель электромагнитной системы турбогенератора ТГ03 .....	17
2.2.4. Модель электромагнитной системы турбогенератора ТГ04 .....	17
2.2.5. Модель электромагнитной системы турбогенератора ТГ05 .....	18
2.2.6. Модель электромагнитной системы турбогенератора ТГ06 .....	18
2.3. Система условных положительных направлений величин в турбогенераторе .....	19
3. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ НА ЭТОЙ ОСНОВЕ .....	21
3.1. Общая основа для численных расчетов магнитных полей в электрических машинах .....	21
3.2. Уравнения для расчета магнитного поля методом конечных разностей .....	21
3.3. Уравнения для расчета магнитного поля методом конечных элементов .....	23
3.4. Ограничение области расчета магнитного поля и граничные условия .....	25
3.5. Программные продукты для расчета магнитных полей на основе метода конечных элементов .....	27
3.6. Электромагнитные параметры ЭМ, определяемые по результатам расчета магнитного поля .....	29
4. ПРОГРАММНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТУРБОГЕНЕРАТОРА .....	34
4.1. Исходные положения .....	34
4.2. Общая характеристика скрипта Lua .....	35
4.3. Конструкторская модель турбогенератора .....	36
4.4. Электромагнитные свойства и параметры физической модели ТГ .....	38
4.5. Управление конечно-элементной структурой расчетной модели ТГ .....	38
4.6. Структура программы построения графической и физической моделей ТГ .....	38
4.7. Файлы исходных данных для программы на скрипте Lua .....	39
4.7.1. Основной файл исходных данных .....	39
4.7.2. Файл исходных данных с кривыми намагничивания .....	40
4.8. Программная реализация расчетной и физической моделей ТГ на скрипте Lua .....	40
4.9. Проверка заданных физических свойств расчетной модели турбогенератора .....	51
4.10. Ознакомление с результатами расчета магнитного поля .....	52

4.1.1.	Работа с программой построения физико-геометрической модели турбогенератора .....	54
5.	ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН ПРИ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТАХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ .....	55
5.1.	Определение фазовых соотношений электромагнитных величин .....	55
5.2.	Уточненная векторная диаграмма в режиме нагрузки .....	58
5.3.	Определение электромагнитных параметров и фазовых соотношений величин в ТГ автоматизированным расчетом магнитного поля в программной среде FEMM .....	59
5.3.1.	Постановка задачи и расчетная модель ТГ .....	59
5.3.2.	Файл исходных данных ТГ для скрипта Lua .....	61
5.3.3.	Скрипт Lua .....	61
5.3.4.	Указания по использованию программы .....	64
5.3.5.	Содержимое файла результатов .....	64
6.	ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАЗНЫХ ВИДОВ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ В МОЩНОМ ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ .....	66
6.1.	Вводные замечания .....	66
6.2.	Расчетные режимы возбуждения ТГ и разные виды реакции якоря .....	68
6.2.1.	Режим холостого хода .....	68
6.2.2.	Индивидуальное магнитное поле трехфазной обмотки статора .....	68
6.2.3.	Совместное действие обмоток ротора и статора .....	69
6.2.4.	Установившееся трехфазное короткое замыкание .....	71
7.	ОРГАНИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМЕ НАГРУЗКИ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ЗАДАННЫХ ЕГО ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ .....	73
7.1.	Постановка задачи .....	73
7.2.	Исходные значения параметров возбуждения для расчета магнитного поля в режиме нагрузки ТГ .....	74
7.3.	Исходный расчет магнитного поля в режиме нагрузки .....	76
7.4.	Итерационный процесс расчета магнитного поля в режиме нагрузки .....	77
7.5.	Алгоритм эффективного поиска параметров возбуждения магнитного поля в режиме нагрузки .....	77
7.6.	Файл исходных данных .....	80
7.7.	Программный файл – скрипт Lua .....	80
8.	РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРА В СТАТИКЕ .....	84
8.1.	Постановка задачи .....	84
8.2.	Магнитная индукция и ее координатные распределения .....	84
8.3.	Численно-полевой анализ силовых действий в турбогенераторе .....	89
8.4.	Анализ индуктивных сопротивлений турбогенератора на основе численных расчетов магнитных полей .....	97
8.5.	Численно-полевой анализ индуктивных сопротивлений рассеяния турбогенератора .....	101
8.6.	Расчет трехмерного распределения магнитного поля .....	104
8.7.	Численно-полевой анализ характеристик турбогенератора .....	107
8.7.1.	Общая постановка задачи .....	107
8.7.2.	Расчет характеристики холостого хода .....	107
8.7.3.	Расчет характеристики короткого замыкания .....	108
8.7.4.	Расчет U-образных характеристик .....	109
8.7.5.	Расчет угловой характеристики .....	112

9.	ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ФУНКЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ВЕЛИЧИН ТГ В ДИНАМИКЕ .....	114
9.1.	Постановка задачи автоматизированного расчета электромагнитных процессов в турбогенераторах в программной среде FEMM в динамике .....	114
9.2.	Теоретические основы расчета временных функций электромагнитных и силовых величин .....	114
9.3.	Общие замечания о скрипте Lua, автоматизировавшем расчет временных функций электромагнитных и силовых величин .....	116
9.4.	Файл исходных данных для скрипта Lua .....	117
9.5.	Структура программы расчета динамики электромагнитных процессов турбогенератора .....	117
9.6.	Скрипт Lua .....	118
9.7.	Указания по использованию программы .....	120
9.8.	Численно-полевой анализ временных функций электромагнитных и силовых величин в турбогенераторах .....	121
9.8.1.	Временные функции магнитной индукции в неподвижных точках зазора ТГ .....	121
9.8.2.	Временные функции магнитной индукции для точек, связанных с вращающимся ротором .....	122
9.8.3.	Временные функции магнитного потокосцепления и ЭДС фазной обмотки статора .....	124
9.8.4.	Динамика силовых действий в турбогенераторах с разными зубцово-пазовыми структурами в номинальном режиме работы .....	126
9.9.	Численно-полевая оценка эффективности укорочения обмотки статора турбогенератора .....	131
9.9.1.	Сравнительный расчетный анализ электромагнитных величин ТГ .....	132
9.9.2.	ЭДС фазной обмотки статора .....	132
9.9.3.	Переменная составляющая магнитной индукции на поверхности вращающегося ротора .....	132
9.9.4.	Электромагнитный момент, действующий на ротор, и его пульсации .....	133
9.9.5.	Сравнение вариантов ТГ при одинаковых номинальных параметрах .....	133
10.	ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ .....	135
10.1.	Гармонический анализ электромагнитных величин трехфазной обмотки статора турбогенератора на основе классических и численно-полевых методов .....	135
10.1.1.	Классический гармонический анализ .....	135
10.1.2.	Классический гармонический численный анализ (КГЧА) .....	137
10.1.3.	Численно-полевой гармонический анализ (ЧПГА) .....	138
10.1.4.	Численно-полевой гармонический анализ на основе однопозиционного расчета магнитного поля .....	138
10.1.5.	Численно-полевой гармонический анализ на основе вращающихся магнитных полей .....	140
10.2.	Сравнительный численно-полевой анализ гармонического состава ЭДС в турбогенераторах .....	142
10.2.1.	Постановка задачи .....	142
10.2.2.	Расчетные режимы и магнитные поля в ТГ .....	143
10.2.3.	Расчетный анализ гармонического состава МПС и ЭДС .....	144
11.	ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ .....	146
11.1.	Постановка задачи .....	146

11.2.	Теоретические основы анализа несимметричного режима работы ТГ .....	147
11.3.	Анализ электромагнитных и силовых процессов в ТГ .....	149
11.3.1.	Магнитное потокосцепление и ЭДС фазных обмоток статора .....	149
11.3.2.	Фазовые соотношения, напряжения и мощности фазных обмоток статора .....	150
11.3.3.	Временные функции магнитной индукции .....	152
11.3.4.	Численно-полевой анализ электромагнитных процессов в роторе турбогенератора при несимметричной нагрузке .....	153
11.3.5.	Силовые процессы в турбогенераторе при несимметрии нагрузки .....	156
12.	АНАЛИЗ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА .....	160
12.1.	Введение в проблему и постановка задачи .....	160
12.2.	Принципы расчета переменной составляющей магнитной индукции на поверхности ротора .....	161
12.3.	Анализ переменной составляющей магнитной индукции на поверхности большого зуба ротора в режимах ХХ и НН .....	161
12.4.	Анализ устойчивости расчета переменной составляющей магнитной индукции на поверхности ротора .....	165
12.5.	Анализ переменной составляющей магнитной индукции на поверхности ротора в режиме КЗ .....	168
12.6.	Сравнительный анализ переменного магнитного поля на поверхности ротора турбогенераторов с разным числом зубцов статора в режиме нагрузки .....	170
13.	ПРОЕКТНЫЙ СИНТЕЗ ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВЫХ РАСЧЕТОВ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ЧИСЛА ПАЗОВ СТАТОРА .....	174
13.1.	Постановка задачи .....	174
13.2.	Базовые величины ТГ, сохраняемые при его модернизации .....	175
13.3.	Математическая модель синтеза электромагнитной системы ТГ .....	175
13.3.1.	Модернизация электромагнитной системы ТГ с изменением радиуса расточки сердечника статора .....	176
13.3.2.	Корректировка ротора с сохранением размеров его пазов .....	177
13.3.3.	Корректировка ротора с изменением размеров его пазов .....	177
13.4.	Структура автоматизированной системы синтеза электромагнитной системы ТГ .....	178
13.5.	Результаты работы программного комплекса синтеза электромагнитной системы ТГ .....	178
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	181
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	183
	ПРИЛОЖЕНИЯ .....	191
	Приложение А – КОНСТРУКЦИИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ .....	191
	Приложение Б – ПРОЦЕДУРЫ – СКРИПТЫ LUA ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ПРОГРАММЕ FEMM .....	197

## ВВЕДЕНИЕ

Монография направлена на развитие теории и методов проектирования электрических машин (ЭМ) на примере турбогенераторов (ТГ) на основе использования численных методов расчета и анализа их магнитных полей, электромагнитных и силовых параметров, характеристик и процессов [1-4]. Это наиболее эффективный путь в этом направлении, потому что основные процессы в ЭМ – вообще, и в ТГ – в частности, происходят именно через существование и взаимодействие магнитных полей. Современные достижения компьютерной техники и программного обеспечения [5, 6] создали базу для реализации этого задания, но их использование еще не приобрело необходимого уровня и далеко не исчерпало потенциальных возможностей отмеченного подхода.

Численные методы компьютерного расчета электромагнитных полей, параметров, характеристик и процессов в ЭМ отличаются универсализмом и высокой точностью, благодаря чему создаются единые условия для теоретического анализа и проектирования ЭМ любых типов. Поэтому система проектирования ЭМ на базе таких методов дает возможность усовершенствования классических методов проектирования ТГ [7, 8] и других ЭМ. Классические методы часто ограничиваются лишь качественным описанием процессов, не обеспечивая необходимую точность расчетов, особенно в случае высокоиспользуемых ЭМ с сильно насыщенным магнитопроводом. Распространенным является также использование разнообразных эмпирических коэффициентов с «потерянным» физическим смыслом.

Существующая классическая система теоретического анализа и проектирования ЭМ построена на упрощенных цепных математических моделях, а также предыдущем опыте их создания и эксплуатации. Для каждого отдельного типа машины, и, особенно, для новых разработок с нетипичными удельными нагрузками, соотношением размеров и, тем более, другой концепцией построения, приходится создавать и проводить длительную наладку собственной специфической методики расчета. Это приводит к чрезмерным расходам трудовых, материальных и энергетических ресурсов, отставанию в тем-

пах развития электромашиностроения, моральному старению производимой продукции.

Использование численных расчетов электромагнитных полей, параметров и процессов позволяет в значительной мере преодолеть эти проблемы. Дело в том, что численные расчеты на основе таких методов, как метод конечных элементов, практически лишены сколько-нибудь существенных допущений и фактически обеспечивают сразу получение ЭМ с заданными параметрами, что устраняет проблему длительных их доводки и наладки. А в теоретическом плане такие подходы обеспечивают не только отображение сути происходящих процессов, но и дает возможность получить реалистичное количественное описание параметров, состояния и процессов исследуемых машин. В итоге, все это позволит улучшить массогабаритные показатели существующих ЭМ, но особенно эффективным это может быть при создании новых образцов машин специального назначения, особенно характеризующихся высоким использованием.

Таким образом, исходя из описанных глобальных задач, конкретной **целью монографии** является подготовка основ дальнейшего развития теории и методов проектирования турбогенераторов на основе численнопольевых методов расчета их электромагнитных полей, параметров, характеристик и процессов, что в итоге направлено на совершенствование имеющихся и создание новых их образцов.

Прежде всего, на пути достижения этой цели возникает задача сочетания достижений в области компьютерной вычислительной техники и классической системы проектирования, которая может существенно модернизироваться путем внедрения в нее численных методов расчета электромагнитных полей, параметров, характеристик и процессов в ЭМ. Это обеспечит такое определение размерно-конструктивных параметров ЭМ, которые будут практически сразу отвечать их заданным технико-эксплуатационным параметрам и характеристикам.

Весомой задачей и важным результатом работы в сформулированном направлении должна явиться также подготовка специали-



стов современного уровня через создание соответствующего учебно-методического обеспечения и его использование в учебном процессе, который является еще одним из путей внедрения работы в производство.

Таким образом, все подчинено реализации сложного задания – органично ввести численные методы расчета электромагнитных полей в процессы изучения, проектирования и исследования ЭМ.

Для успешной работы на внутригосударственном рынке и выхода на мировой рынок является необходимым устойчивое научно-техническое развитие экономического благополучия страны. Поэтому, если формулировать задачу в более конкретном направлении, соответствующем определенной цели, то необходимо вести работы по повышению технического уровня ТГ при проведении их замены или модернизации на электростанциях с целью улучшения их массогабаритных и энергетических показателей при условии сохранения или даже повышении надежности в условиях работы современных энергетических систем [9].

Эти задачи отображены в «Энергетической стратегии Украины на период до 2030 г.», где указано, что повышение энергетической безопасности объединенных энергетических систем Украины (ТЭС, АЭС, ГАЭС и ГЭС) возможно путем повышения технико-экономических показателей основного оборудования электростанций и, в первую очередь, создания современных, надежных, конкурентоспособных ТГ. Их маневренность, стойкость в переходных режимах, возможность работы с перегрузками в аварийных ситуациях обеспечит энергетическую независимость страны, что является весьма важным в современных условиях.

Технический уровень ТГ повышается путем использования современных изоляционных и конструкционных материалов, новых производственных технологий [10], технологий диагностики при производстве и эксплуатации, а также путем создания моделей и методов оптимизации массогабаритных параметров. А еще – за счет развития теории и методов их проектирования на основе численных методов анализа их электромагнитных параметров с использованием современных компьютерной техники и программного обеспечения.

Турбогенераторы относятся к самым ответственным и высокоиспользуемым ЭМ. Это образующая основа электроэнергетической системы, их эффективность и надежность обеспечивают такие же показатели всей системы. Неустойчивость работы ТГ,

выход из строя приводит к неприемлемым убыткам и даже к разбалансу всей системы.

Производство ТГ присуще лишь нескольким государствам мира, в числе которых и Украина, благодаря единственному предприятию - ГП «Завод Электротяжмаш» (г. Харьков). В настоящее время он обеспечивает модернизацию или замену ТГ на электростанциях Украины, а также других стран [9].

подавляющее большинство турбогенераторов ТЭС Украины изготовлена именно этим заводом. Поэтому при конкретных расчетах в монографии применяются расчетные модели ТГ именно этого предприятия.

Новой научной основой для этого является созданная на кафедре электрических машин НТУ «ХПИ» объединенная система теоретического обоснования и практического подхода к проектированию высокоиспользуемых ЭМ, которая строится на основе методов компьютерного численного расчета их электромагнитных полей, параметров, характеристик и процессов.

Актуальность поставленного задания заключается еще и в том, что большинство турбогенераторов ТЭС Украины отработали свой срок службы. Они не отвечают современным требованиям эффективности, надежности и маневренности, которые возникли при нынешнем состоянии энергетики, а также в результате острой необходимости приведения показателей оборудования к международным нормам в связи с возможной будущей интеграцией объединенной энергосистемы Украины с Европейской энергетической системой (ЕЭС).

В основу монографии положен комплекс научных статей автора по исследованию ТГ на основе численно-полевых методов. Большинство из них отображено в обзорной работе [11] и повторяются здесь в расширенном варианте [12-52]. Эти статьи можно найти на сайте НТУ «ХПИ» в цифровом репозитории в разделе кафедры электрических машин электромашиностроительного факультета по ссылке <http://sites.kpi.kharkov.ua/kem/>.

В качестве теоретических основ, которые используются в этих работах и здесь, можно отметить фундаментальные положения ЭМ [52-54], теоретической электротехники [54-56], численных методов расчета магнитных полей [1-3] и математики [57]. Как дополнительная основа численных расчетов магнитных полей используются методы, изложенные в работах автора применительно к другим типам ЭМ [58-63].

Численные расчеты магнитных полей проведены с использованием собственных программ автора, а также широко распро-

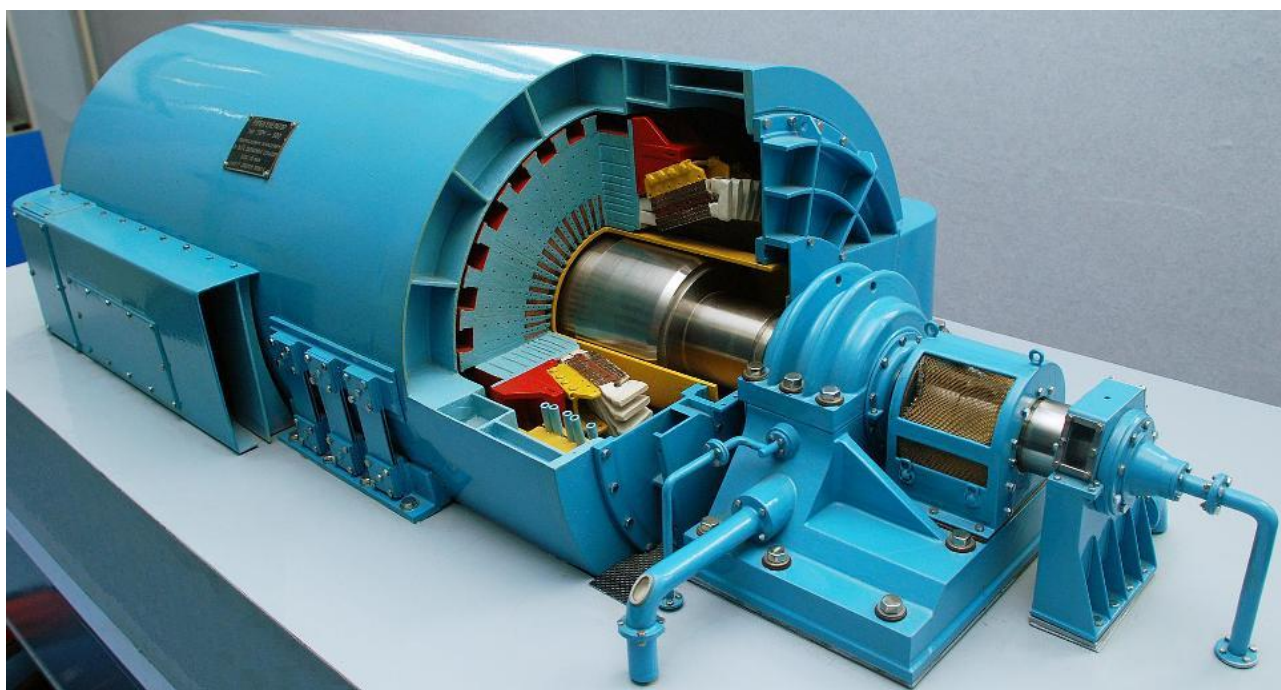
страненной, эффективной и бесплатной программы FEMM [5].

Буквенные обозначения электромагнитных, силовых и других общих электротехнических величин и параметров ЭМ подчинены действующим стандартам Украины и международным стандартам, которые в комплексе представлены в [64].

Известно, что работа ТГ связана с различными физическими аспектами [65], которые имеют электромагнитную, силовую, тепловую, механическую, аэродинамическую, гидравлическую и иную природу. Однако в монографии круг задач ограничен теми аспектами, которые обозначены в ее названии. Причем электромагнитные и силовые параметры и процессы рассматриваются в активной части ТГ – в пределах длины его сердечников. Такие же процессы происходят и в торцевых зонах ТГ, однако это тема отдельного исследования – со значительным перечнем работ автора в этом направлении можно ознакомиться в обзорной работе [66].

Здесь также не ставилась задача обзора обширного комплекса исследований турбогенераторов, но далеко не лишним будет с благодарностью упомянуть великую когорту разработчиков, создателей и исследователей, внесших огромный вклад в развитие турбогенераторостроения Украины, а именно, это: Асанбаев В. Н., Васьковский Ю. Н., Гордненко В. Ю., Грубой А. П., Зозулин Ю. В., Кильдышев В. С., Кобзарь И. В., Кобзарь К. А., Коврига А. Е., Кузьмин В. В., Левченко Г. Г., Лившиц А. Л., Постников И. М., Ракогон В. Г., Роговой И. Х., Савельев Ю. Е., Саратов В. А., Станиславский Л. Я., Счастливы Г. Г., Титко А. И., Федоренко Г. М., Хаймович Л. Л., Черемисов И. Я., Шакарян Ю. Г. и еще много, много других их коллег.

Для первичной подготовки к восприятию объектов исследования и оперирования с ними на рисунке представлена раскрытая модель ТГ, одного из их многочисленных вариантов.



Масштабированная модель турбогенератора

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общая идея монографии – численно-полевые расчеты и анализ электромагнитных и силовых параметров и процессов в турбогенераторах воплотилась в следующих основных ее положениях:

- представление расчетных моделей электромагнитной системы турбогенераторов и взаимосвязанной системы направлений координат и электромагнитных величин в пространстве и на векторных диаграммах;

- краткое ознакомление с численными методами расчета магнитных полей и электромагнитных и силовых параметров электротехнических объектов, в том числе и электрических машин, на этой основе;

- программное формирование геометрических и физических моделей (токи обмоток статора и ротора и их фазовый сдвиг, свойства материалов) турбогенератора в среде FEMM;

- метод определения электромагнитных параметров и их фазовых соотношений посредством численных расчетов магнитных полей в турбогенераторе и его реализация посредством автоматизированных расчетов в программной среде FEMM;

- численно-полевой анализ режимов возбуждения и разных видов реакции якоря в мощном турбогенераторе;

- организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров;

- расчетный анализ электромагнитных и силовых параметров турбогенератора в статике;

- принципы расчета и анализ временных функций электромагнитных и силовых величин турбогенератора в динамике и его реализация посредством автоматизированных расчетов в программной среде FEMM;

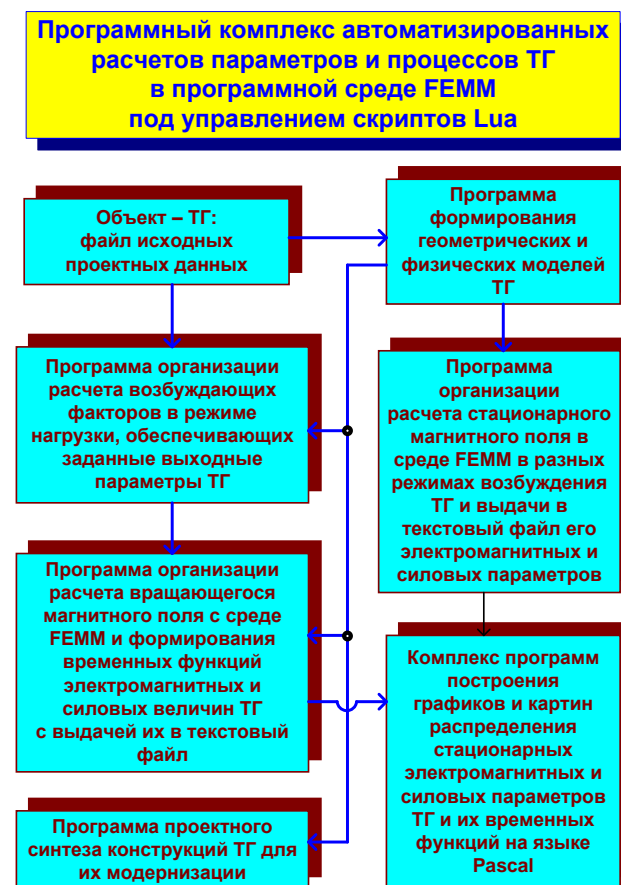
- методы гармонического анализа электромагнитных величин в турбогенераторах на основе численно-полевых расчетов и проверка на этой основе адекватности классического метода гармонического анализа в электрических машинах;

- метод численного расчета и анализ электромагнитных и силовых параметров и процессов в турбогенераторе при его несимметричной нагрузке;

- метод расчета и анализ переменного магнитного поля на поверхности вращающегося ротора турбогенератора в разных режимах его возбуждения;

- организация автоматизированного проектного синтеза турбогенератора на основе автоматизированного численно-полевого расчета в программной среде FEMM и пример его реализации при варьировании числа пазов статора.

К основным результатам, представленным в монографии, относится также созданный программный комплекс, проиллюстрированный в укрупненной форме следующей блок-схемой:



В этом комплексе возможно получение широкого круга электромагнитных и силовых параметров турбогенератора в статике и динамике численно-полевыми расчетами, а именно:

- магнитные потоки и потокосцепления;
- ЭДС обмоток;
- индуктивные сопротивления обмоток;
- распределение магнитной индукции и напряженности магнитного поля;
- напряжения обмоток;
- падения магнитного напряжения на участках магнитопровода;
- магнитные потери мощности;

- электромагнитный момент;
- силы, действующие на токонесущие элементы обмоток;
- силы, действующие на элементы ферромагнитных сердечников;
- фазовые соотношения электромагнитных величин;
- выделение переменных составляющих величин;
- мощности электромагнитная и активная;
- гармонический анализ периодических величин;
- различные характеристики турбогенератора;
- разнообразный иллюстративный материал и так далее.

В итоге отметим, что приведенные в монографии комплекс математических выражений различных величин, методы расчета и автоматизированный программный комплекс являются универсальными и пригод-

ными для последующей реализации практически для любых типов электрических машин. Возможные отличия могут проявляться в постановке полевой задачи, то есть в определении размеров областей расчета магнитного поля, задании соответствующих граничных условий, установлении сочетаний возбуждающих факторов – токов в обмотках.

Примеры использования и более подробное изложение теоретических и практических аспектов рассмотренного подхода к исследованию параметров и процессов в электрических машинах даны в ряде работ [11-51], посвященных турбогенераторам, а также во множестве работ, например, [62, 63, 66, 67, 68, 69], относящихся к другим типам электрических машин.

Наукове видання

МІЛИХ Володимир Іванович

ЧИСЕЛЬНО-ПОЛЬОВІ РОЗРАХУНКИ І АНАЛІЗ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ  
Ї ПРОЦЕСІВ В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ

Російською мовою

Відповідальний за випуск проф. В. І. Мілих  
Монографію до видання рекомендував проф. А. М. Борисенко  
В авторській редакції

План 2017 р., поз. 21.

Підп. до друку 12.01.2017 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсет.  
Друк. цифровий. Гарнитура Bookman Old Style.  
Ум. друк. лист. 23,7. Наклад 100 прим. Зам. № 9.

Видавець і виготовлювач: ФОП Панов А. М.  
Свідоцтво серії ДК №4847 від 06.05.2015 р.  
м. Харків, вул. Жон Мироносиць (Раднаркомівська), 10, оф. 6  
тел.+38(057)714-06-74, +38(050) 976-32-87  
copi@vlavke.com.ua, <http://vlavke.com.ua>



# ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВЫЕ РАСЧЕТЫ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ

(МОНОГРАФИЯ)

## Милых Владимир Иванович

Профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электрические машины» НТУ «Харьковский политехнический институт».

Награжден знаком «Відмінник освіти України». Является членом специализированного ученого совета по защитах диссертаций по специальностям «Электрические машины и аппараты» и «Техника сильных электрических и магнитных полей». Ответственный редактор серии «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії» Вісника НТУ «ХП», руководитель постоянно действующего семинара «Електромагнітні та теплові процеси високовикористаних електричних машин» Наукової ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики», соорганизатор ежегодного Международного симпозиума «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA).



Руководитель и ответственный исполнитель ряда хоздоговорных и госбюджетных НИР по тематике тяговых и прокатных электрических машин постоянного тока, асинхронных двигателей, турбогенераторов, а также таких специальных машин, как вентильно-индукторный генератор, линейные импульсные электродвигатели для стартового ускорения летающих объектов и для возбуждения сейсмических колебаний при разведке полезных ископаемых, стартер-генератор для турбин летающих объектов и других разработок.

Автор монографии является автором или соавтором 171 статьи в специализированных научных изданиях, из них 26 проиндексированы в наукометрической базе Scopus, есть еще 140 статей в научных сборниках и тезисах докладов, а также 8 авторских свидетельств. Им издано 2 учебника и 16 учебных пособий.

E-mail: [mvikemkpi@gmail.com](mailto:mvikemkpi@gmail.com)

Сайт кафедры электрических машин:  
<http://web.kpi.kharkov.ua/elmash/>